

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SIMULACIÓN  
PARA LA ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE LOS  
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS SOBRE EL SISTEMA  
ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE PEREIRA

ANGIE VANESSA PENAGOS RIOS  
DANIELA ZULUAGA OCAMPO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
PEREIRA  
JUNIO 2018

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SIMULACIÓN  
PARA LA ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE LOS  
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS SOBRE EL SISTEMA  
ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE PEREIRA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

ANGIE VANESSA PENAGOS RIOS  
DANIELA ZULUAGA OCAMPO

DIRECTOR  
ALEJANDRO GARCÉS RUIZ, PH.D.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
PEREIRA  
JUNIO 2018

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.1.1. Objetivo general . . . . .	3
1.1.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.2. Abreviaturas . . . . .	4
1.3. Justificación . . . . .	4
1.4. Marco teórico y estado del arte . . . . .	5
1.4.1. Vehículos Eléctricos(VEs) . . . . .	5
1.4.2. Metodo Monte-Carlo . . . . .	6
1.4.3. Matriz Origen-Destino . . . . .	7
1.4.4. Sistemas de información geográficos . . . . .	8
<b>2. Modelo dinámico de un vehículo eléctrico</b>	<b>10</b>
<b>3. Simulación de Monte-Carlo</b>	<b>14</b>
<b>4. Implementación de la simulación</b>	<b>17</b>

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	<i>2</i>
4.1. Variables consideradas . . . . .	17
4.1.1. Subestaciones eléctricas . . . . .	17
4.1.2. Rutas aleatorias . . . . .	19
4.1.3. Vehículos . . . . .	21
4.2. Modelo dinámico . . . . .	23
<b>5. Resultados</b>	<b>25</b>
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>29</b>

# Resumen

Este proyecto propone una simulación de la movilidad de los vehículos eléctricos en la ciudad de Pereira, determina el impacto sobre la demanda de energía eléctrica de la ciudad observando el nivel de energía consumida por los vehículos que recorren diferentes rutas en las horas pico. Se implementa una simulación Monte-Carlo a través de la cual se eligen las rutas y vehículos que serán tomados en cuenta para el desarrollo y ejecución del algoritmo, también se hace uso de diferentes herramientas para la administración de información geográfica, al igual que los datos suministrados por la matriz origen-destino que indica el número de vehículos que recorren la ciudad desde una subestación eléctrica a otra; el nivel de energía se obtiene a través de un modelo dinámico de un vehículo eléctrico que permite calcular la energía eléctrica consumida por la batería del vehículo. Esta simulación proporciona la demanda de energía eléctrica para cada subestación de la ciudad.

# Capítulo 1

## Introducción

El gas carbono es un compuesto presente en la atmósfera de la tierra el cual es considerado como un gas de efecto invernadero, aunque éste es generado por medios naturales, su incremento acelerado se debe a las actividades humanas tales como el uso de combustibles fósiles en la industria y el transporte, la agricultura intensiva, la ganadería y el sistema eléctrico de potencia. [1]. Desde el año 2014 se han presentado emisiones de carbono de mas de nueve millones de toneladas por año [2], generando una creciente preocupación debido a la contaminación del aire y el agua con los problemas de salud; esto ha hecho que se busquen alternativas que no sean tan agresivas con el medio ambiente. En Colombia se han realizado grandes esfuerzos para mitigar los daños por emisiones de combustibles fósiles enfocándose principalmente en el sector del transporte [3], uno de estos esfuerzos consiste en adoptar la tecnología de los vehículos eléctricos (VE) por medio del plan nacional de desarrollo, en este se plantea la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) la cual busca desligar el crecimiento de las emisiones de gases efecto invernadero, entre ellos el gas carbono, del crecimiento económico nacional. [4].

### 1.1. Planteamiento del problema

Con la integración de la ECDBC dentro del plan nacional de desarrollo de Colombia [4] se han planeado grandes cambios dentro de la movilidad y el

desarrollo de ciudades como Pereira, siendo uno de estos cambios la inserción de vehículos eléctricos e híbridos; con este enfoque se espera que para el 2050 los vehículos eléctricos e híbridos participen con un 60 % en el transporte privado, con un 90 % en la flota de taxis y con un 80 % en la de buses [5] con el fin de ayudar a mejorar el transporte en el país y el cuidado del medio ambiente; por esto los sistemas eléctricos de ciudades como Pereira deben estar preparados para atender la gran cantidad de vehículos eléctricos ya que las baterías que utilizan éstos son recargadas directamente desde la red y el tiempo de recarga depende del tipo de vehículo y del punto de donde se está recargando, este último puede disminuir el tiempo incluso a la mitad si se hace desde un punto de gran potencia, esto provoca que haya más demanda eléctrica proveniente de las subestaciones [6], es por esto que se plantea la siguiente pregunta de investigación.

**¿Cual es el impacto que se presentará sobre el sistema eléctrico de la ciudad de Pereira con la futura masificación de los vehículos eléctricos?**

Para dar respuesta a esta pregunta es necesario usar un modelo matemático establecido anteriormente[7] el cual permita por medio de simulaciones de la movilidad vehicular en la ciudad de Pereira, evaluar la descarga de las baterías de estos vehículos y así estimar el impacto que estos provocan en el sistema eléctrico de la ciudad de Pereira al conectarse para recargar sus baterías. La simulación de Monte-Carlo, al ser un método escalable que permite generar procesos u objetos aleatorios, los cuales surgen de un modelado de un sistema que se presenta dentro de la cotidianidad[8], puede ser considerado como un algoritmo ideal para realizar la simulación propuesta y así poder evaluar los impactos resultantes de la inserción de VEs dentro del sistema eléctrico de la ciudad de Pereira brindando de esta manera una herramienta para la planeación de el abastecimiento de electricidad en la ciudad.

### 1.1.1. Objetivo general

Simular los niveles de energía consumida por vehículos eléctricos para diferentes porcentajes de penetración en la ciudad de Pereira.

### 1.1.2. Objetivos específicos

1. Evaluar el modelo matemático de carga y descarga de la batería de un vehículo eléctrico en conjunto con estudios previos del sistema de transporte en la ciudad de Pereira.
2. Implementar computacionalmente la simulación de Monte-Carlo con recorridos aleatorios en diferentes partes de la ciudad de Pereira.
3. Estimar el impacto en el sistema eléctrico que tiene aplicar de forma masiva la tecnología de vehículos eléctricos en la ciudad de Pereira.
4. Analizar los resultados obtenidos de la estimación del impacto en el sistema eléctrico

## 1.2. Abreviaturas

- VE: Vehículo Eléctrico
- VEs: Vehículos Eléctricos
- ECDBC: Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono
- SIG: Sistema de Información Geográfica
- QGIS: Quantum GIS(Geographic Information System)
- EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
- AMCO: Área Metropolitana Centro Occidente

## 1.3. Justificación

Durante los últimos años Colombia se ha visto afectada por el cambio climático y los efectos de las emisiones de gases. A causa de esto se han realizado estudios que han identificado que unas de las principales fuentes de emisión se da en el sector del transporte terrestre, en el cual más del 90 % de las emisiones se deben a el uso de combustibles fósiles. Específicamente en el departamento de Risaralda, el 26 % del total de las emisiones se deben al uso de estos combustibles[1]. A causa de estas cifras se han planteado



grandes proyectos con los cuales se pretende reducir el 20 % de las emisiones generadas para el 2030 [9], entre estos proyectos se encuentra la inserción y masificación de los VEs.

Con la futura masificación de los VEs en la movilidad y el transporte en Colombia, enfocándose principalmente en la ciudad de Pereira, el sistema eléctrico deben estar preparado para cumplir las demandas de los usuarios que se encuentran dentro de la ciudad al conectar sus VEs para ser cargados. con este proyecto se pretende realizar una herramienta que por medio de simulaciones entregue información confiable acerca de los niveles de energía consumidos por las baterías de los VEs en diferentes rutas aleatorias, entre las diferentes zonas que existen en la ciudad de Pereira, para así calcular el impacto resultante de los VEs dentro de la red eléctrica.

## 1.4. Marco teórico y estado del arte

### 1.4.1. Vehículos Eléctricos(VEs)

Los VEs son medios de transporte que utilizan la electricidad como fuente de energía para sus motores, esta energía es suministrada desde una batería la cual es cargada al conectarla a la red eléctrica y descargada durante el uso de la misma, ayudando en gran medida a la reducción del consumo de combustibles fósiles.

Los VE como alternativa de los vehículos de combustión hacen su aparición en 1828, cuando fue presentado el modelo a escala de un VE impulsado por un motor eléctrico inventado por el húngaro Ányos Jedlik, una década más tarde fue creado otro modelo a escala de un VE diseñado por el profesor Stratingh de Groningen, Holanda dando así la posibilidad a hombres como Thomas Davenport y Robert Davidson de que construyeran el primer vehículo que utilizaba baterías eléctricas no recargables, el cual a pesar de su avance continuaba teniendo problemas con la mayoría de sus componentes resaltando entre estos las baterías utilizadas, debido a que no tenían la capacidad de almacenamiento suficiente para VEs óptimos.

Con el paso de los años la tecnología de los VEs fue avanzando hasta entrar al mercado alcanzando una gran popularidad [10], sin embargo desde 1930 los VE empezaron a desaparecer del mercado debido a los grandes

avances que tuvieron los vehículos con motor de combustión interna y los bajos precios de la gasolina. Fue hasta 1970 que algunos países volvieron a tomar en cuenta los VE debido a una crisis energética [11], pero estos aún continuaban en su etapa de investigación y desarrollo, hasta que en 1998 un VE corrió desde Los Ángeles hasta Detroit sin mostrar fallas en sus componentes críticos, comprobando que la tecnología de los VEs era una buena opción para reemplazar los vehículos de combustión interna; en esta misma década se formó la primera flota de taxis eléctricos en la ciudad de Nueva York construidos por «Electric Carriage and Wagon Company» de Filadelfia.

Años después, en el 2005 fue lanzado por Tesla Motors un VE deportivo con una batería de ión-litio mejorando las características de estos vehículos, después en el año 2006 sale el Bluecar, un vehículo eléctrico que posee un 30 kW/h batería de polímero de litio y una velocidad máxima de 130 km/h [12] avanzando aún más en la tecnología de los VEs con respecto a su debilidad más representativa la cual es la velocidad. En el 2014, con la intención de presentar la industria del automóvil en las próximas décadas, servir como un marco para la investigación y el desarrollo en torno a los VEs, acelerar el interés general en estos automóviles y promover la sostenibilidad nace a Formula-E, un campeonato de la FIA que presenta autos de Fórmula propulsados exclusivamente por energía eléctrica [13] y que puede hacer que los VEs tomen espacios significativos en el mercado global, debido a las ventajas que estos presentan tanto en cuidado al medio ambiente como en mantenimiento de los vehículos, convirtiéndose en una tecnología prometedora para cambiar el sistema de transporte por uno más amigable con los usuarios y su entorno.

#### 1.4.2. Metodo Monte-Carlo

Desde los inicios de la computación y el descubrimiento del potencial de las máquinas se ha buscado realizar grandes cálculos para resolver problemas que se presentan en la cotidianidad; la simulación de Monte-Carlo es un algoritmo simple, flexible y escalable que tiene como objetivo la generación de objetos o procesos aleatorios por medio de una computadora en objetos que pueden surgir naturalmente, esta puede ser usada como muestreo, estimación y optimización de modelos y tiene aplicación en una gran variedad de áreas del conocimiento tales como la industria, procesos físicos, estadísticas computacionales, entre otros [8].

La simulación de Monte-Carlo surge en 1945, cuando la construcción de la primera computadora, el ENIAC, provoca el renacimiento de una técnica matemática conocida como muestreo estadístico el cual debido a su entorno es nombrado como el método Monte-Carlo [14]. Después de esto la simulación de Monte-Carlo empezó a ser aplicada en diferentes áreas del conocimiento como la investigación de operaciones, en donde es usada para proporcionar un diseño, programación y control óptimos de los sistemas industriales, también es usada en procesos físicos y estructuras, para la solución de problemas clásicos de transporte y otras investigaciones en diferentes áreas del conocimiento como lo es el transporte de fotones a través del tejido biológico.[8]

### 1.4.3. Matriz Origen-Destino

Las matrices origen destino son tablas en las cuales se representan los nodos principales de la red de transporte, estas tienen como intención representar los patrones de tráfico de un área seleccionada, mediante una matriz cuyas filas indexan los puntos de origen y las columnas los destinos (Ver figura 1.1). La matriz origen destino es considerada como uno de los problemas clásicos dentro del estudio del tráfico en las grandes ciudades [15] y es una herramienta muy útil para la planificación de los sistemas de transporte al analizar la demanda del servicio de transporte.[16] La información de estas matrices se obtienen por diferentes métodos, comúnmente de encuestas de transporte [17] o nuevas técnicas propuestas que permiten obtener los datos necesarios de forma más sencilla y aprovechando la tecnología actual, una de estas metodologías obtiene la información por medio de los registros de llamadas telefónicas y la cantidad de personas que pasan por un determinado escenario en un cierto tiempo [18]; otra metodología para obtener la información es por medio de las tarjetas inteligentes que son usadas como medios de pago entre las estaciones de buses, con estas se registran todos los viajes realizados en el sistema de transporte público para alimenta a matriz origen-destino. Las metodologías mencionadas anteriormente son algunas de las maneras usadas para obtener los datos que permiten estimar una matriz origen-destino que brinda una información segura y confiable de la movilidad en cualquier punto del día. [16].

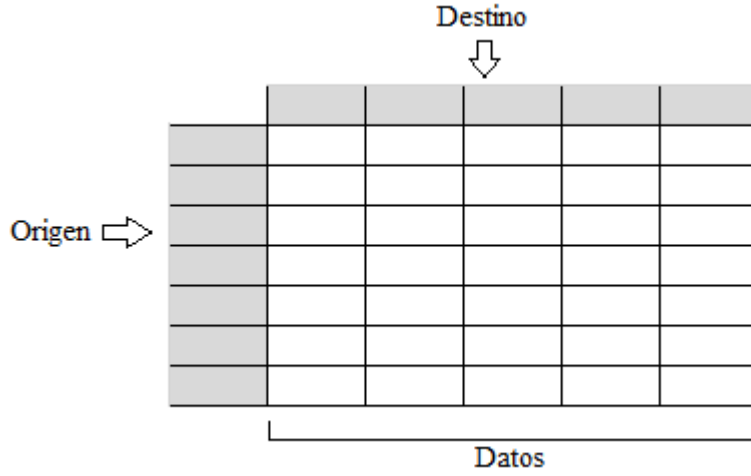


Figura 1.1: Estructura de matriz origen-destino

Para hacer uso de la simulación de Monte-Carlo con el objetivo de responder la pregunta de investigación planteada es necesario usar una representación de los patrones de viaje que presentarán los vehículos eléctricos en la ciudad de Pereira, como ya se ha planteado la matriz origen-destino es la representación más usada [17]. En la ciudad de Pereira se han realizado algunos estudios en los cuales se plantea una matriz origen destino del Área Metropolitana Centro Occidente (AMCO) para la planificación de los transportes, en estas se busca identificar el número de viajes futuros y su distribución espacial dentro de la ciudad [19]; otro de estos estudios busca usar métodos como las tarjetas inteligentes para plantear una matriz origen-destino para el sistema MegaBús de la ciudad y así obtener la información del sistema de transporte público [20] y por último se observa la matriz origen destino realizada por el grupo de investigación SIRIUS la cual será la base para resolver la pregunta de investigación planteada en este proyecto.

#### 1.4.4. Sistemas de información geográficos

Se conoce como Sistema de Información Geográfica a la integración de datos espaciales con datos no espaciales y la visualización de estos. Básicamente es una base de datos que contiene información geográfica que comúnmente es utilizada para investigaciones, análisis, planificación entre

otras cosas referentes a los territorios [21], esto debido a la evolución que significan los computadores dado a que éstos permiten trabajar de una forma más cómoda y eficiente con los datos geográficos y dar una buena representación a través de mapas obteniendo mejores resultados frente a los sistemas tradicionales [22]. Los SIG surgen debido a que era necesario mantener una relación entre las diferentes coberturas sobre la superficie de la tierra para posteriores estudios[21]; actualmente algunos de los usos que se le dan a los SIG son la navegación asistida por ordenador, la gestión catastral, la toma de decisiones para la asignación de recursos, entre otras aplicación que utilizan de estas herramientas [22].

Para realizar este proyecto se utiliza QGIS, el cual es un sistema de información geográfica de código abierto que nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año; actualmente admite diversos formatos de datos raster y vectoriales que permiten que miles de usuarios lo utilicen para la visualización de datos SIG [23].

Algunas de las características de esta herramienta que se utilizan en este trabajo son:

1. **Explorar datos y componer mapas:** Permite componer mapas y explorar datos espaciales interactivamente con una GUI amigable.
2. **Crear, editar, gestionar y exportar datos:** Permite crear, editar, administrar y exportar capas vectoriales y ráster en varios formatos.
3. **Consola de Python:** Es posible aprovechar la consola de Python integrada para crear scripts que automaticen diferentes procesos que se pueden realizar dentro de este sistema.

## Capítulo 2

# Modelo dinámico de un vehículo eléctrico

Un modelo se puede considerar como una representación muy cercana de un conjunto de elementos que se relacionan entre si en el mundo real, esta representación suele estar compuesta por una combinación de datos empíricos, suposiciones de ingeniería y algoritmos basados en la física los cuales permiten realizar diferentes tipos de experimentos para obtener información específica sobre el comportamiento de los elementos relacionados; en la actualidad existe una gran cantidad de modelos que permiten la simulación de sistemas que se pueden observar en la cotidianidad, un ejemplo de estos sistemas son los vehículos. Gracias a los modelos se puede representar de manera muy cercana el comportamiento del sistema de un vehículo, para así entregar diferentes datos tal como la predicción casi instantánea del consumo y el rendimiento de un combustible, [24] o en el caso de los VE's, por medio de un modelo es posible obtener grandes cantidades de información importante como lo es la autonomía (capacidad de los automóviles en la que pueden avanzar sin necesidad de ser conectados de nuevo), la potencia o la energía gastada por la batería del vehículo al recorrer una ruta.

En el presente trabajo se realiza una simulación con una representación cercana del modelo de un vehículo eléctrico para averiguar cuales son los niveles de energía consumidos por las baterías de los VE's en la ciudad de Pereira a través las diferentes subestaciones en las que se divide la ciudad (Centro, Dosquebradas, Ventorrillo, Cuba, Naranjito), por lo tanto en el mo-

delo planteado se deben tener en cuenta diferentes aspectos característicos de la región y del vehículo tales como el perfil del terreno (topografía), la dirección del recorrido del vehículo, las fuerzas entre la carretera y las llantas, la aerodinámica y la gravedad para así evaluar el consumo de energía según la distancia recorrida de una zona a otra en la ciudad de Pereira.

Para realizar el calculo de los niveles de energía y así implementar la simulación planteada en este proyecto, se usa el modelo presentado por David Wenzhong Gao en su artículo "Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles" [24], el cual se basa en la segunda ley de Newton que establece que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa, siendo la fuerza neta la sumatoria de todas las fuerzas que son aplicadas al vehículo.

$$a = \frac{\sum F}{m} \quad (2.1)$$

Con base en esta ley se calcula entonces la sumatoria de todas las fuerzas que son aplicadas al vehículo, estableciendo así que la fuerza neta que actúa sobre el vehículo es equivalente a:

$$F_d = F_{gxt} + F_{roll} + F_{ad} + ma \quad (2.2)$$

Donde  $F_{gxt}$  es la fuerza gravitacional que se ejerce sobre el vehículo,  $F_{roll}$  es la resistencia de rodadura correspondiente a la rueda contra las llantas,  $F_{ad}$  es la resistencia aerodinámica del vehículo,  $m$  es la masa del vehículo y  $a$  es la aceleración natural tomada por el vehículo al recorrer una ruta, a continuación se presenta un diagrama de fuerzas en donde se puede observar como las fuerzas mencionadas anteriormente actúan sobre el vehículo

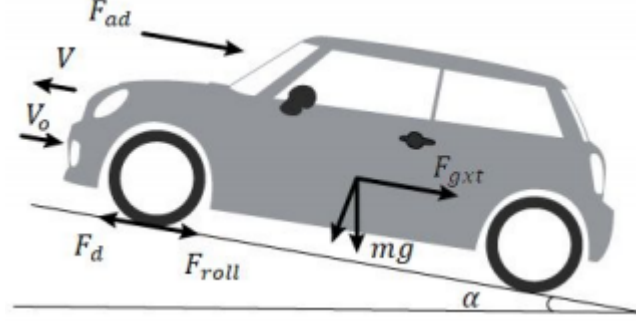


Figura 2.1: Fuerzas que actúan sobre VE's

El equivalente cada una de las fuerzas establecidas en el modelo según el diagrama de fuerzas es:

$$F_{gxt} = mgsin(\alpha) \quad (2.3)$$

$$F_{roll} = C_r mgcos(\alpha) \quad (2.4)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (V + V_0)^2 \quad (2.5)$$

$$ma = \left(m + \frac{J_{wh}}{r^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (2.6)$$

Siendo  $g$  la aceleración gravitacional de la tierra,  $\alpha$  el ángulo de elevación de cada tramo de la ruta,  $C_r$  el coeficiente de rodamiento de la rueda,  $\rho$  la densidad del aire,  $C_d$  el coeficiente de resistencia aerodinámica,  $A_f$  el área frontal del vehículo,  $V$  la velocidad de cada tramo de la ruta,  $V_0$  la velocidad del viento,  $J_{wh}$  la inercia de la rueda,  $r^2$  el radio de la rueda, y  $\frac{dv}{dt}$  la aceleración natural.

Después de remplazar el equivalente de cada una de las fuerzas en la ecuación 2.2 se puede establecer entonces que  $F_d$  es equivalente a:



$$F_d = mgsin(\alpha) + C_r mgcos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho C_d A_f (V + V_0)^2 + \left(m + \frac{J_{wh}}{r^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (2.7)$$

Para calcular entonces la potencia que puede gastar el VE de una ruta a otra se usa la siguiente ecuación:

$$P_t = F_d V \quad (2.8)$$

Que es equivalente a la siguiente ecuación:

$$P_t = mgsin(\alpha)V + C_r mgcos(\alpha)V + \frac{1}{2} V \rho C_d A_f (V + V_0)^2 + V \left(m + \frac{J_{wh}}{r^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (2.9)$$

Donde  $P_t$  es la potencia necesaria para que el VE recorra una ruta establecida y  $V_{ev}$  la velocidad que el VE toma en cada uno de los tramos de la ruta establecida. A continuación para conocer la energía consumida debemos usar la siguiente expresión:

$$E = \int P_t \cdot dt \quad (2.10)$$

Calculando así la energía que posiblemente pueda consumir un vehículo al recorrer una ruta establecida.

## Capítulo 3

# Simulación de Monte-Carlo

Existen algunos problemas cuyas variables tiene muchos posibles valores y esto hace que sea complicado realizar cálculos o análisis con todos los posibles estados existentes de manera manual, el método de Monte-Carlo es una técnica que permite resolver estos problemas por medio del análisis numérico de diversos sistemas de gran tamaño que utilizan la aleatoriedad para muestrear los valores o estados de las variables, se hace de esta forma debido a que frecuentemente el número de posibles valores para cada variable es muy elevado y hace difícil la resolución del problema tomando en cuenta la totalidad de estos, es por eso que se opta por tomar una muestra y estimar valores promedio a partir de esta, estableciendo entonces la solución del problema por medio del análisis de los valores de la muestra a través de métodos estocásticos como lo es la simulación descrita en esta sección. [25]

Con la evolución que ha tenido la tecnología en la actualidad, específicamente los computadores, es posible procesar de una manera rápida y eficiente sistemas y técnicas, como lo es la simulación de Monte-Carlo, que para el ser humano requieren de mucho tiempo y trabajo por la gran cantidad de datos que estos poseen y los cuales están expuestos a una gran posibilidad de error o que simplemente es inalcanzable una solución de forma manual, por esta razón en esta tesis se hace uso de la tecnología actual para encontrar una aproximación al problema planteado frente a los VE en la ciudad de Pereira. Se ha decidido utilizar la simulación de Monte-Carlo debido a diversos factores, uno de ellos y el más significativo es la cantidad de posibles rutas que un automóvil puede tomar para ir de un punto de la ciudad a otro, es

por esto que es necesario tomar una muestra de las rutas para poder procesar el algoritmo con ellas, otro factor importante son los automóviles que se utilizan en el modelo, es preciso tener en cuenta que la energía consumida depende de las características del vehículo utilizado, teniendo en cuenta esto se ha decidido tomar de forma aleatoria el vehículo que va a recorrer cada una de las rutas.

A continuación se observa una representación del algoritmo por medio de un diagrama de flujo para realizar la simulación planteada en este documento:

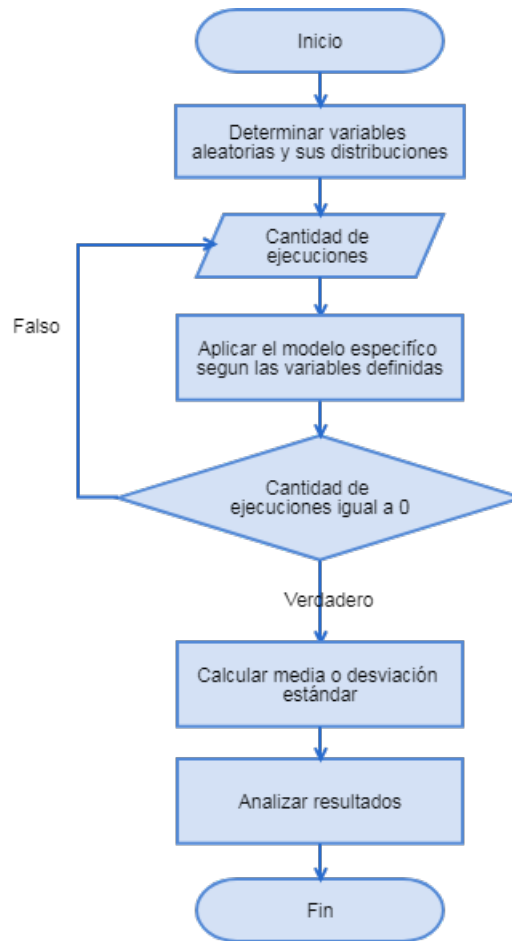


Figura 3.1: Algoritmo Monte-Carlo

Cada una de las variables que se determinan para la ejecución del algoritmo deben ser generadas aleatoriamente para cumplir con las condiciones del mismo, el comportamiento que tiene la generación de las variables es descrito por una función de distribución de probabilidad la cual establece la forma en la que varían los datos, algunas de las funciones de distribución más comunes y mejor adaptadas a las variables generadas para la simulación de Monte-Carlo son las siguientes [26]:

- **Normal:** Esta distribución define sus resultados de probabilidad en base a los parámetros de la media y la desviación estándar. [27]
- **Triangular:** Proporciona una primera aproximación cuando hay poca información disponible, de forma que sólo se necesita conocer el mínimo valor o el mas pesimista, el máximo valor o el más optimista y la moda que corresponde al valor más probable. [27]
- **Uniforme:** La distribución uniforme es útil para describir una variable aleatoria con probabilidad de ocurrencia constante sobre un intervalo conocido.[27]
- **Poisson:** Describe la probabilidad de que ocurra un suceso aleatorio  $k$  veces en un intervalo de tiempo fijo si sabemos que este suceso se repite en promedio un numero de veces independientemente del tiempo transcurrido desde el suceso anterior. [28]

Este modelo proporciona una primera aproximación cuando hay poca información disponible, de forma que sólo se necesita conocer el mínimo (valor pesimista), el máximo (valor optimista) y la moda (valor más probable).

## Capítulo 4

# Implementación de la simulación

### 4.1. Variables consideradas

Esta simulación se alimenta de múltiples variables donde la mayoría de estas se obtienen de forma aleatoria según lo establecido en el método de Montecarlo, la función de probabilidad que se define para la generación aleatoria de estas variables corresponde a la distribución uniforme ya que dentro de los rangos establecidos para la generación de las variables(subestaciones, lista de vehículos) todos los valores tienen la misma posibilidad de ocurrir.

#### 4.1.1. Subestaciones eléctricas

Las primeras variables consideradas para este proyecto son las subestaciones eléctricas que proporcionan energía a las zonas en las que se divide la ciudad de Pereira (Centro, Dosquebradas, Ventorrillo, Cuba, Naranjito), esta división fue establecida en la matriz origen-destino que fue realizada por el grupo de investigación SIRIUS teniendo en cuenta información entregada por la empresa de energía de Pereira, esta considera la cartografía del mapa de la ciudad de Pereira para ubicar las posibles zonas de alimentación de las subestaciones para la simulación de gasto energético de los VE's. Estas

matrices se usa con el objetivo de tener una aproximación real de los viajes que se realizan en la ciudad de Pereira de Lunes a Viernes en horas de alto tráfico como lo son de 6 a 9, 12 a 14 y de 18 a 20; en la figura 4.1 se puede observar cual es la distribución espacial de estas subestaciones en la ciudad.

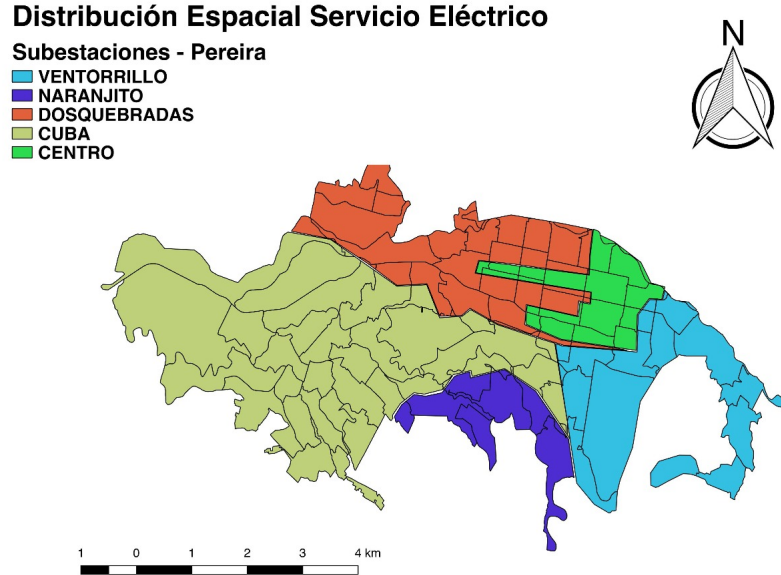


Figura 4.1: Subestaciones eléctricas de Pereira [29]

Con el objetivo de mantener un orden para los archivos generados en el algoritmo se establece la siguiente notación para referirse a las subestaciones:

V1	Centro
V2	Dosquebradas
V3	Ventorrillo
V4	Cuba
V5	Naranjito

Tabla 4.1: Orden de subestaciones

#### 4.1.2. Rutas aleatorias

Las segundas variables consideradas en el proyecto son las rutas por las cuales los VE's transitaran en la ciudad de Pereira, estas rutas deben ser generadas aleatoriamente para cumplir con las necesidades del método Montecarlo. El primer paso para generar las rutas de manera aleatoria es generar puntos aleatorios dentro de las zonas establecidas por las subestaciones, la cantidad de puntos aleatorios es establecida por la matriz origen-destino la cual nos proporciona la información de cuantos viajes se dan de una zona a otra zona en la ciudad de Pereira.

	V1	V2	V3	V4	V5
V1	674	859	147	257	160
V2	632	819	205	245	128
V3	354	460	18	117	4
V4	949	1425	135	582	84
V5	276	364	59	112	29

Tabla 4.2: Matriz Origen-Destino (Lunes 6-9 am)

Basados en la matriz origen-destino se realiza la generación de puntos de manera aleatoria por medio de QGIS el cual es un sistema de información geográfica(SIG) de código abierto licenciado bajo GNU-General Public License [23], este sistema posee diferentes funcionalidades las cuales permiten establecer las limitaciones geográficas (en el caso de este proyecto se establecieron los limites de cada una de las subestaciones) y también permite la generación de puntos aleatorios dentro de las zonas limitadas como se puede observar en la figura 4.2; a continuación utilizando la libreria PyQGIS la cual permite ejecutar scripts(archivos de ordenes) del lenguaje Python dentro de QGIS se generan los archivos en donde se especifica el origen y el destino de cada una de las rutas en términos de latitud y longitud.

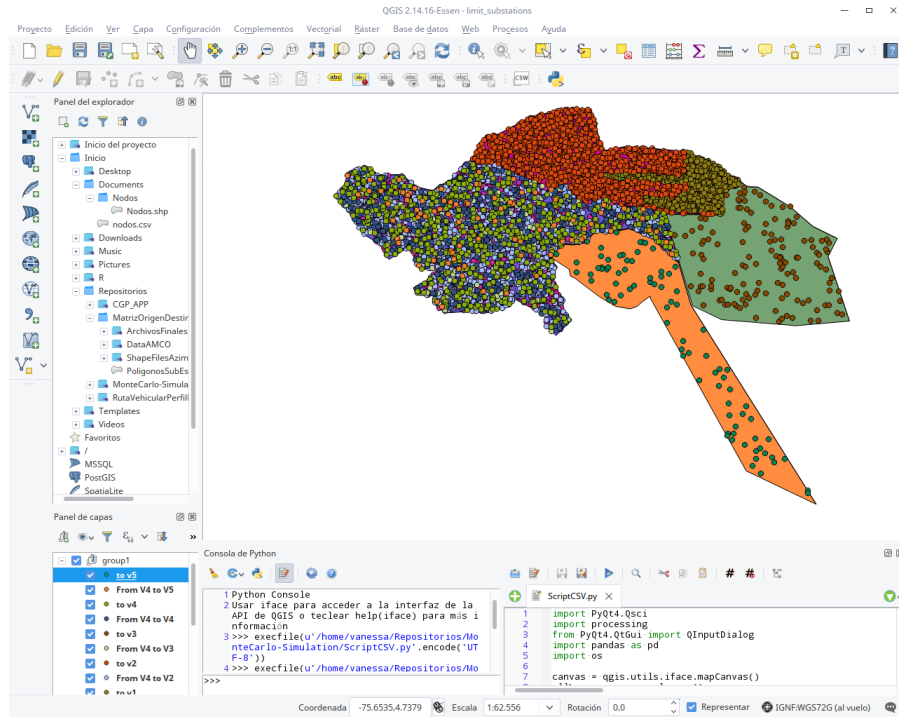


Figura 4.2: Ejemplo de generación de puntos aleatorios

Después de la generación de las rutas es necesario investigar los datos que caracterizan a la misma para aplicarlos en el modelo dinámico, estos datos corresponden a:

- **Sub-puntos de la ruta:** Son puntos que describen la ruta ya definida, esto se realiza con el objetivo de que sea más preciso el calculo de la velocidad y el ángulo de elevación.
- **Distancia:** Espacio que existen entre cada sub-punto dentro de la ruta
- **Duración:** Tiempo en que se tarda en recorrer el vehículo la distancia establecida de un sub-punto a otro.
- **Ángulo de elevación:** Angulo que describe la altura sobre el nivel del mar de los recorridos que describe cada sub-punto



Para obtener los datos mencionados se hace uso de dos APIs ofrecidas por el servicio de Google Maps, la primera API usada corresponde a la Directions API la cual devuelve indicaciones de varias partes para una serie de waypoints, también llamados sub-puntos, además de el tiempo y la distancia de cada una de estas indicaciones [30]. La segunda API usada corresponde a Elevation API que se utiliza para realizar consultas de ubicaciones en la superficie terrestre y obtener datos de elevación de las mismas [31]; el archivo que se obtiene después de usar las API's corresponde al siguiente:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	X1	Y1	X2	Y2	Subpoints_origin	Subpoints_destiny	Distance	Duration	Elevation
2	4.82161968546	-75.6934418767	4.79948013807	-75.7148188077	[4.8222456, -75.69351739999999]	[4.8227082, -75.6912787]	258.0	80.0	2.71606029633
3					[4.8227082, -75.6912787]	[4.823003, -75.688931]	277.0	68.0	0.442122906654
4					[4.823003, -75.688931]	[4.8207308, -75.686493]	489.0	100.0	1.60309637788
5					[4.8207308, -75.686493]	[4.814007999999999, -75.68744400000001]	856.0	103.0	0.831214405072
6					[4.814007999999999, -75.68744400000001]	[4.8102524, -75.6923492]	863.0	98.0	1.3993435304
7					[4.8102524, -75.6923492]	[4.8076815, -75.6933846]	527.0	80.0	2.04063191308
8					[4.8076815, -75.6933846]	[4.8038282, -75.69511279999999]	522.0	73.0	0.942107689919
9					[4.8038282, -75.69511279999999]	[4.80538, -75.6981799]	389.0	36.0	1.79369010661
10					[4.80538, -75.6981799]	[4.806530299999999, -75.70308419999999]	616.0	58.0	0.755323533614
11					[4.806530299999999, -75.70308419999999]	[4.806331, -75.70320439999999]	26.0	5.0	1.36851360199
12					[4.806331, -75.70320439999999]	[4.805359999999999, -75.70114000000001]	273.0	38.0	0.494548184803
13					[4.805359999999999, -75.70114000000001]	[4.8037942, -75.7094166]	1442.0	171.0	0.799031912694
14					[4.8037942, -75.7094166]	[4.8023039, -75.7093283]	173.0	24.0	1.1863340126
15					[4.8023039, -75.7093283]	[4.8004224, -75.7089021]	225.0	43.0	0.499325641338
16					[4.8004224, -75.7089021]	[4.7989697, -75.70743550000002]	257.0	44.0	4.8745583581
17					[4.7989697, -75.70743550000002]	[4.7990686, -75.70611219999999]	150.0	28.0	2.76239301521
18					[4.7990686, -75.70611219999999]	[4.79744, -75.70792999999999]	289.0	38.0	0.0922357187241
19					[4.79744, -75.70792999999999]	[4.798225, -75.709501]	195.0	32.0	3.54321017745
20					[4.798225, -75.709501]	[4.798545499999999, -75.7094809]	46.0	8.0	5.38905597535
21					[4.798545499999999, -75.7094809]	[4.7987891, -75.71127680000001]	250.0	41.0	2.62251714422
22					[4.7987891, -75.71127680000001]	[4.7994261, -75.7128433]	192.0	29.0	4.82255109295
23					[4.7994261, -75.7128433]	[4.79892, -75.71342]	88.0	20.0	4.2511304471
24					[4.79892, -75.71342]	[4.7992281, -75.7140154]	74.0	21.0	6.35047821237
25					[4.7992281, -75.7140154]	[4.7993985, -75.71469119999999]	86.0	26.0	3.78843063547
26	4.8113499845	-75.699700955	4.77205094072	-75.6867013882	[4.8113826, -75.6997404]	[4.811899999999999, -75.69963]	60.0	10.0	1.95579695142
27					[4.811899999999999, -75.69963]	[4.8119, -75.69879]	94.0	25.0	0.502524199971
28					[4.8119, -75.69879]	[4.8084798, -75.6981713]	372.0	127.0	1.98278627593
29					[4.8084798, -75.6981713]	[4.806189, -75.695164]	532.0	58.0	0.165199249266

Figura 4.3: Ejemplo de archivos generados

#### 4.1.3. Vehículos

Las terceras variables consideradas para el proyecto corresponden a los vehículos que recorrerán las rutas establecidas aleatoriamente en la ciudad de Pereira, para la implementación del algoritmo presentado se establecen tres modelos de VE's con los que se encontrarán los resultados y se presentarán las conclusiones de este proyecto; estos vehículos son seleccionados de manera aleatoria durante la ejecución de la simulación de Montecarlo.



Figura 4.4: Vehículos usados

El primer vehículo utilizado corresponde al modelo Kia Soul EV, fabricado por la empresa Kia Motors desde el 2014, posee un puerto de carga rápida de CC, tiene una potencia máxima de 109W y posee una autonomía de 0-178.6 km según la EPA [32]. Los datos a tener en cuenta para este modelo son los siguientes

Masa del vehículo (kg)	1492
Área frontal (m)	2.42
Radio rueda (m)	0.275
Momento inercia	1.5
Coefficiente aerodinámico	0.35
Coefficiente de rodadura	0.127

Tabla 4.3: Datos Kia Soul EV

El segundo vehículo utilizado corresponde al modelo Chevrolet Spark

Classic EV, comercializado desde el año 2013, tiene una potencia máxima de 97 kW y posee una autonomía de 140 km, Los datos a tener en cuenta para este modelo son los siguientes:

Masa del vehículo (kg)	1300
Área frontal (m)	2.06
Radio rueda (m)	0.165
Momento inercia	1.3
Coeficiente aerodinámico	0.33
Coeficiente de rodadura	0.212

Tabla 4.4: Datos Chevrolet Spark Classic EV

El tercer vehículo utilizado corresponde al modelo Nissan LEAF ZERO EMISSION, comercializado desde el año 2010, tiene una potencia máxima de 110 kW y posee una autonomía de 350 km [33], Los datos a tener en cuenta para este modelo son los siguientes:

Masa del vehículo (kg)	1685
Área frontal (m)	2.27
Radio rueda (m)	0.275
Momento inercia	1.5
Coeficiente aerodinámico	0.29
Coeficiente de rodadura	0.127

Tabla 4.5: Datos Nissan LEAF

## 4.2. Modelo dinámico

Después de determinar y generar las variables que son consideradas en la simulación, se hace uso del lenguaje Python para realizar la implementación del algoritmo. Esta implementación inicia con el recorrido de todos los archivos en donde se encuentran las rutas generadas por medio de QGIS, PyQGIS y las diferentes API's de Google con el objetivo de acceder a todos los datos que caracterizan a las rutas (sub-puntos, duración, distancia, ángulo de elevación) y a la cantidad de iteraciones que se deben realizar sobre los datos; durante el recorrido de estos archivos se selecciona de manera

aleatoria uno de los VE's listados anteriormente el cual recorrerá durante la simulación la ruta elegida.

A continuación se ingresan las características de la ruta y del vehículo elegido en modelo dinámico presentado en la sección 2, el cual permite calcular la energía consumida por el VE durante el recorrido de la ruta seleccionada. Los resultados generados por el modelo después de todas las iteraciones son almacenados en archivos csv, en estos archivos se especifica la zona en la cual se genera el consumo y la energía necesaria para cargar de nuevo la batería del VE por cada ruta, para así calcular la cantidad de energía necesaria para suplir la necesidad de cada sub-estación; la implementación de esta simulación puede ser encontrada en el repositorio MonteCarlo-Simulation alojado en la plataforma GitHub [34] . A continuación se presenta un diagrama de flujo el cual describe los pasos seguidos para implementar la simulación de Monte-Carlo para VE's en la ciudad de Pereira:

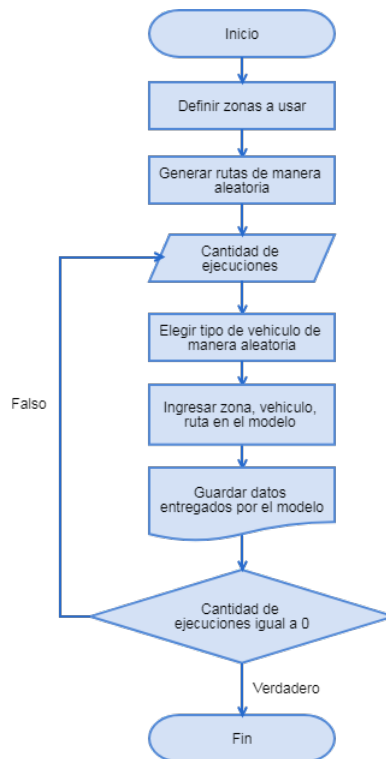


Figura 4.5: Algoritmo Monte-Carlo para VE's en la ciudad de Pereira

## Capítulo 5

# Resultados

El algoritmo propuesto en este documento entrega la cantidad de energía consumida por la batería de los diferentes VE's en el recorrido de cada una de las rutas generadas aleatoriamente, en las siguientes tablas se presenta la información obtenida de la ejecución del algoritmo implementado, el número de vehículos que se encuentra en la tabla es proporcionado por la matriz origen destino:

	6-9		12-14		18-20	
	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)
<b>Lunes</b>	2885	4.56E+14	951	1.79E+14	951	1.79E+14
<b>Martes</b>	2930	5.05E+14	2930	1.60E+14	2930	1.57E+14
<b>Miercoles</b>	2923	4.86E+14	920	1.64E+14	920	1.59E+14
<b>Jueves</b>	2902	4.99E+14	852	1.48E+14	852	1.38E+14
<b>Viernes</b>	3118	4.75E+14	873	1.48E+14	873	1.51E+14

Tabla 5.1: Resultados del Centro

	6-9		12-14		18-20	
	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)
<b>Lunes</b>	3927	8.79E+14	1344	2.54E+14	1344	3.02E+14
<b>Martes</b>	3969	8.71E+14	1300	2.85E+14	1300	2.85E+14
<b>Miercoles</b>	3975	8.80E+14	1314	2.73E+14	1314	2.75E+14
<b>Jueves</b>	3941	8.55E+14	1241	2.71E+14	1241	2.67E+14
<b>Viernes</b>	4192	8.77E+14	1282	2.71E+14	1282	2.70E+14

Tabla 5.2: Resultados del Dosquebradas

	6-9		12-14		18-20	
	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)
<b>Lunes</b>	564	1.55E+14	788	4.36E+13	163	4.55E+13
<b>Martes</b>	562	1.45E+14	783	4.57E+13	154	4.38E+13
<b>Miercoles</b>	564	1.54E+14	150	3.79E+13	150	3.50E+13
<b>Jueves</b>	564	1.52E+14	150	4.19E+13	150	3.49E+13
<b>Viernes</b>	590	1.34E+14	150	3.70E+13	150	3.65E+13

Tabla 5.3: Resultados de Ventorrillo

	6-9		12-14		18-20	
	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)
<b>Lunes</b>	1313	3.54E+14	315	1.95E+14	788	2.10E+14
<b>Martes</b>	1322	3.46E+14	783	2.09E+14	783	2.12E+14
<b>Miercoles</b>	1330	3.46E+14	810	2.07E+14	810	2.02E+14
<b>Jueves</b>	1308	3.32E+14	774	1.88E+14	774	1.88E+14
<b>Viernes</b>	1394	3.45E+14	810	2.05E+14	810	1.97E+14

Tabla 5.4: Resultados de Cuba

	6-9		12-14		18-20	
	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)	Cant. VE's	Energia (W)
<b>Lunes</b>	405	1.35E+14	315	9.85E+13	315	9.80E+13
<b>Martes</b>	419	1.38E+14	323	1.09E+14	323	1.09E+14
<b>Miercoles</b>	405	1.34E+14	339	1.10E+14	339	1.11E+14
<b>Jueves</b>	406	1.36E+14	323	1.02E+14	323	1.03E+14
<b>Viernes</b>	419	1.28E+14	323	1.06E+14	323	1.14E+14

Tabla 5.5: Resultados de Naranjito

Las gráficas que se muestran a continuación ilustran los resultados obtenidos para las diferentes sub-estaciones eléctricas de la ciudad de Pereira, estos resultados muestran la cantidad de energía que debe ser suministrada por la red a lo largo de la semana en las horas pico, teniendo en cuenta que los VE's recargan sus baterías en el lugar de destino de la ruta tomada.

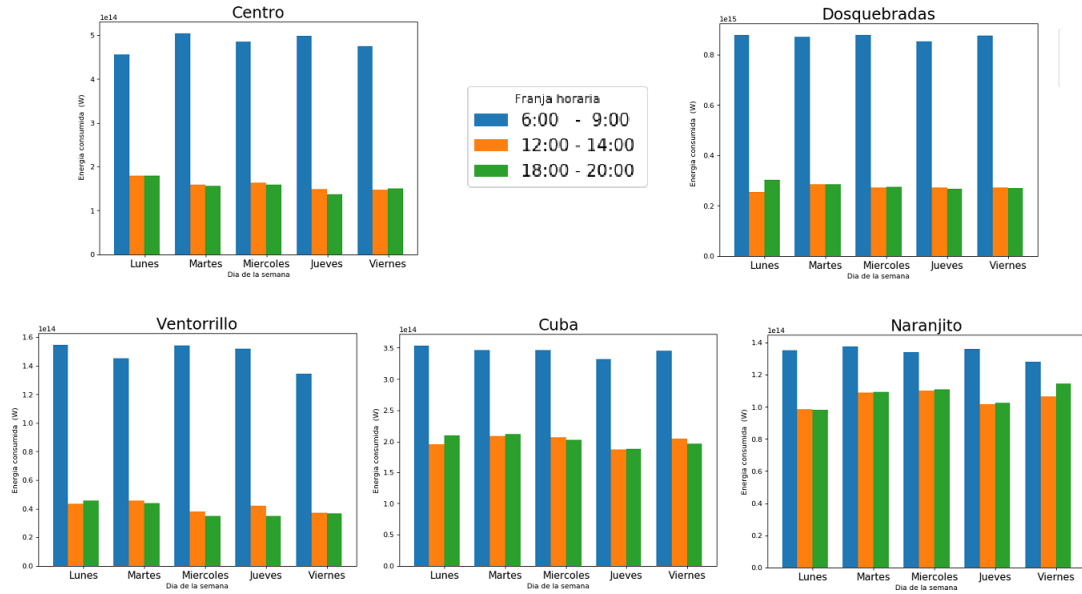


Figura 5.1: Energía por día en cada zona

Se realizó un promedio con los resultados obtenidos en todos los días de la semana en los diferentes horarios, a continuación se muestra una gráfica que representa el promedio de los niveles de energía consumidos en las diferentes subestaciones de la ciudad de Pereira durante horas pico.

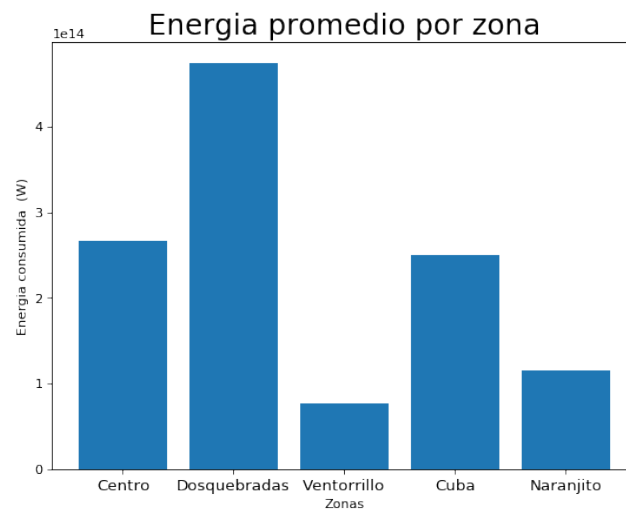


Figura 5.2: Energía promedio por zona



## Capítulo 6

# Conclusiones y trabajos futuros

- La simulación de Monte-Carlo implementada en este proyecto muestra que las subestaciones eléctricas que pertenecen a la ciudad de Pereira necesitarán suministrar más energía en la hora pico que corresponde al horario de 6:00 a 9:00 de la mañana, se puede observar que de las 3 franjas horarias seleccionadas (6:00 - 9:00, 12:00 - 14:00, 18:00 - 20:00) es esta la que consume más energía, según la simulación esto ocurre para todos los días de la semana.
- La simulación implementada establece que las sub-estaciones de distribución deben poder suplir los siguientes niveles de energía:  $2.67E+11$  W para Centro,  $4.74E+14$  W para Dosquebradas,  $7.61E+13$  W para Ventorrillo,  $2.49E+14$  W para Cuba y  $1.15E+14$  para Naranjito.
- En los resultados obtenidos se puede observar que la subestación eléctrica Dosquebradas es la que más energía deberá suministrar a la ciudad de Pereira, esto se debe al gran flujo de vehículos que se movilizan desde las diferentes zonas de la ciudad hasta esta, la siguiente subestación con mas necesidad energética es Centro seguida de las subestaciones de Cuba, Naranjito y Ventorrillo respectivamente.
- El modelo dinámico elegido para la simulación de Monte-Carlo es un modelo que permite tener en cuenta variables importantes tal como la elevación del terreno en el cual se moviliza el vehículo, esta elevación puede afectar en gran medida el calculo de los niveles de energía que

necesita la batería de los vehículos y el impacto que pueden presentar los mismos en las sub-estaciones eléctricas ya que la región en la que se encuentra la ciudad de Pereira se considera una región montañosa.

- Contar con herramientas tecnológicas como lo son QGIS, Python, PyQGIS y las API's entregadas por Google permite que la implementación del algoritmo de la simulación de Monte-Carlo sea una tarea mucho mas sencilla y mucho más aproximada a la realidad, además de que gracia a la ayuda tecnológica realizar la simulación con una gran cantidad de datos es una tarea posible. Sin embargo se recomienda realizar la implementación del algoritmo con herramientas que se consideren gratuitas y sin restricciones, esto podría acercar más a la realidad la simulación ya que se entregaría en tiempo real la información de las rutas generadas aleatoriamente.
- Para las variables consideradas a la hora de implementar la simulación de Monte-Carlo, se trabajaron con tres tipos diferentes de vehículos eléctricos los cuales permitieron que existieran una variedad de opciones y así llegar a una buena implementación, sin embargo para suministrar resultados más aproximados es recomendable usar un numero de vehículos más extenso lo que haría la simulación mas cercana a la realidad de la ciudad de Pereira. También es posible acercar mas la simulación a la realidad si para la generación de rutas aleatorias se tienen presente más franjas horarias, ya que se puede tener un seguimiento más detallado del movimiento que tienen los habitantes de la ciudad de Pereira.
- Con los datos suministrados por este proyecto es posible establecer la cantidad de energía que es consumida por los VE's que se movilizan en la ciudad de Pereira, con esta información y las cantidades promedio de energía suministrada por cada una de las sub-estaciones eléctricas se puede realizar una simulación que permita conocer las condiciones de la red eléctrica de distribución y si es necesario implementar un plan de acción para afrontar el consumo de energía que puede presentar la llegada de los VE's a la ciudad de Pereira.

# Bibliografía

- [1] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM and Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD. *Inventario Nacional Y Departamental De Gases Efecto Invernadero - Colombia*. 2016.
- [2] EPA. Global Greenhouse Gas Emissions Data. *Carbon Dioxide Information Analysis Center Oak Ridge National Laboratory USA Oak Ridge TN Department of Energy*, (5):U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, 2009.
- [3] Estefanía Marchán and Lisa Viscidi. TRANSPORTE VERDE en América Latina. 2015.
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Colombia. Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono ECDBC. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, page 7, 2010.
- [5] The UK 2050 Calculator. 2050 Pathways Calculator (MARKAL), 2017.
- [6] Endesa. El coche eléctrico, 2014.
- [7] Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, and Kai Strunz. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. 2013.
- [8] Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 6(6):386–392, 2014.
- [9] Carolina GACÍA ARBELAÉZ, Gabriel VALLEJO, Mary Lou HIGGINS, and Elsa Matilde ESCOBAR. *El Acuerdo De París Así Actuará Colombia Frente Al Cambio Climático*. 2016.

- [10] Clean Energy Ministerial. a Brief History of Electric Vehicles. 2014(Mets):75739, 2013.
- [11] C.C. Chan. The state of the art of electric and hybrid vehicles [Prolog]. *Proceedings of the IEEE*, 90(2):245–246, 2002.
- [12] Melissa García Ruíz. Pasado, presente y futuro de vehiculos electricos. *Universidad Tecnológica De Pereira. Programa De Ingeniería Eléctrica*, pages 4–54, 2015.
- [13] FIA 2013-2018. Formula E Powertrain. 2013.
- [14] N Metropolis. The beginning of the Monte Carlo method. *Los Alamos Science*, 15:125–130, 1987.
- [15] Gabriel Michau, Nelly Pustelnik, Pierre Borgnat, Patrice Abry, Alfredo Nantes, Ashish Bhaskar, and Edward Chung. A Primal-Dual Algorithm for Link Dependent Origin Destination Matrix Estimation. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 3(1):104–113, 2017.
- [16] Azalden A. Alsger, Mahmoud Mesbah, Luis Ferreira, and Hamid Saffi. Use of smart card fare data to estimate public transport origin–destination matrix. 2535:88–96, 01 2015.
- [17] A Spatial-Temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles. *Applied Energy*, 114:456–465, 2014.
- [18] Md Shahadat Iqbal, Charisma Choudhury, Pu Wang, and Marta C. Gonzalez. Development of origin–destination matrices using mobile phone call data. 40:63–74, 03 2014.
- [19] Juan Sebastian and Caicedo Pulido. CONSTRUCCION DE MATRIZ ORIGEN DESTINO DE TRANSPORTE PARA EL AMCO (2008). (2008):313, 2010.
- [20] Marvin Luis Jiménez Narváez and José A. Soto Mejía. Utilización de tarjetas inteligentes para estimar matrices origen-destino. Aplicación al sistema Megabús, Pereira. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(2):73–93, 2016.
- [21] Omar Javier, Solano Rodríguez, Sandra Cristina, Riascos Erazo, and Adriana Aguilera Castro. Sistemas De Información Geográfica - Sig. *Mejora De Los Sistemas De Cartografía Del Territorio Colombiano*, pages 1–42, 2007.

- [22] Sistemas de Información Geográfica: Revisión de su Estado Actual.
- [23] Qgis community team. Bienvenido al proyecto QGIS!, 2015.
- [24] Chris Mi. Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles. 95(August):729–745, 2016.
- [25] Nelcy Yazmn Nio Alfonso. Generación de espectros de rayos x de baja energía por simulación Monte Carlo / Monte Carlo simulation of x ray spectra of low energies. page 107, 2011.
- [26] José Roberto González Dan. Introducción del factor humano al análisis de riesgo. 2015.
- [27] Emmanuel Serrano. Distribuciones de probabilidad. pages 17–21, 2012.
- [28] Ignacio Illana. Métodos Monte Carlo. 2013.
- [29] Yensy Helena Gómez. <https://github.com/YensyGomez/MatrizOrigenDestino>.
- [30] Google. Google Maps Directions API — Google Developers, 2015.
- [31] Google. Google Maps Elevation API — Google Developers, 2015.
- [32] Kia Soul 2018 — Vehículo eléctrico tipo crossover compacto — Kia.
- [33] Autonomía y recarga, Nissan LEAF.
- [34] Angie Vanessa Penagos Rios and Daniela Zuluaga Ocampo. <https://github.com/Nany262/MonteCarlo-Simulation>.